

# 桩基工程对长江防洪堤边坡稳定性的计算分析

雷国辉<sup>1</sup>, 雷国刚<sup>2</sup>, 胡新元<sup>3</sup>

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 南京市水利建筑工程总公司, 江苏 南京 210036;  
3. 连云港市水利局, 江苏 连云港 222004)

**摘要** 针对某工程在软土地基上的长江防洪堤边坡架设管廊后的边坡稳定问题, 采用抗剪强度折减有限单元法, 选取 3 个典型断面, 对比分析了现有边坡以及桩基施工并承载后边坡的稳定性。结果表明, 桩基的存在和其所承受的荷载分别对边坡的稳定性具有有利和不利的影响, 通过将桩端设置在合适的持力层上, 正反两方面的影响基本可以抵消, 桩基及管廊施工后对江堤边坡的稳定性影响很小。

**关键词** 边坡稳定 桩基工程 抗剪强度折减技术 稳定安全系数 强度折减系数 有限单元法  
**中图分类号** :TU452 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2006)02-0049-04

**Calculation and analysis of effect of piling on slope stability of a flood dike of Yangtze River**//LEI Guo-hui<sup>1</sup>, LEI Guo-gang<sup>2</sup>, HU Xin-yuan<sup>3</sup>(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Water Conservancy Construction Corporation, Nanjing 210036, China; 3. Lianyungang Water Conservancy Bureau, Lianyungang 222004, China)

**Abstract** : In a project, a pile-supported pipe rack is to be constructed on the slope of a flood dike of the Yangtze River, which is built on a soft ground. The pipe rack may be subjected to vertical and horizontal loads and bending moments induced by wind and earthquakes. For investigation of the effect of piling on the stability of the slope, three typical slope sections were chosen for slope stability analyses. By use of the finite element method with the shear strength reduction technique, the stability of the slope with and without pile-supported pipe rack was assessed and compared. It is shown that the piles supporting the pipe rack improve the stability of the slope, while the loads on the piles cause the instability of the slope. The pros and cons of the piling effect on the stability of the flood dike slope may be balanced out by placement of the piles on an appropriate bearing stratum.

**Key words** : slope stability; piling; shear strength reduction technique; safety factor; strength reduction factor; finite element method

某中外合资石化公司因原料输入和产品输出需要, 拟在长江南京段宝塔水道防洪堤外侧边坡上修建一条 720 m 长的管廊。地质详勘资料显示, 堤基上覆土层主要为第四系全新统河漫滩相沉积物, 其中 30 m 以上的管廊堤基多为高含水量、高孔隙比、高压缩性、低强度的淤泥质软土。由于地基土工程性质较差, 软弱土层较厚, 且管廊荷载较大, 设计采用桩基础来支撑管架。为研究沿江管廊桩基方案的可行性, 确保长江防洪堤的稳定, 本文对防洪堤边坡上无桩基和有桩基两种情况下边坡的稳定性进行了对比分析。

边坡稳定分析通常采用传统的极限平衡法来进行评估。然而, 基于条分法的极限平衡分析难以考虑现实工程中任何埋入边坡内的结构与土的共同作

用<sup>[1]</sup>。本工程中江堤边坡上施工有支撑管廊的桩基。因此, 采用平面应变有限单元法, 并运用抗剪强度折减技术<sup>[2-7]</sup>来分析边坡的稳定性。

## 1 工程及地质状况

根据工程地质勘探资料, 选取了 3 个典型断面(断面 A、断面 B 和断面 C)进行边坡稳定分析, 其地基土质主要由粉土和黏土组成, 地质剖面图如图 1 所示。表 1 和表 2 分别列出了地基各土层的物理和力学性质指标。场地地下水属孔隙潜水类型, 受大气降水和长江水补给, 与长江有水力联系。勘察期间测得地下水埋深在 0.1 ~ 3.6 m 之间, 高程在 5.27 ~ 7.14 m 之间。

3 个稳定计算断面的边坡形状如图 1 所示。防

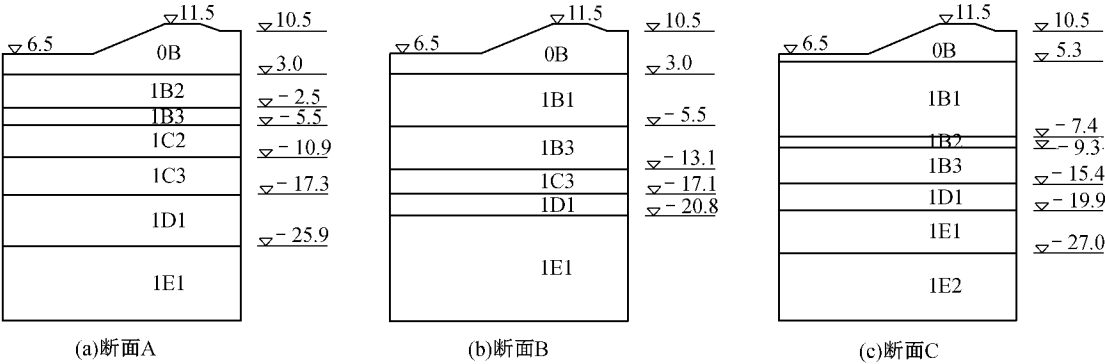


图 1 典型断面的地质剖面图

表 1 土层的物理性质指标

| 层号  | 土层名称    | 含水率/% | 相对密度 | 密度/<br>( g · cm <sup>-3</sup> ) | 干密度/<br>( g · cm <sup>-3</sup> ) | 孔隙比   | 液限/<br>% | 塑限/<br>% | 液性指数 |
|-----|---------|-------|------|---------------------------------|----------------------------------|-------|----------|----------|------|
| 0B  | 素填土     | 32.8  | 2.74 | 1.79                            | 1.35                             | 1.041 | 37.6     | 22.9     | 0.72 |
| 1A1 | 粉质黏土    | 33.5  | 2.74 | 1.86                            | 1.40                             | 0.969 | 36.2     | 22.5     | 0.83 |
| 1B1 | 淤泥质粉质黏土 | 41.4  | 2.74 | 1.77                            | 1.26                             | 1.185 | 39.1     | 24.1     | 1.17 |
| 1B2 | 粉 土     | 36.2  | 2.70 | 1.77                            | 1.29                             | 1.092 | 31.9     | 23.5     | 1.45 |
| 1B3 | 淤泥质粉质黏土 | 38.8  | 2.73 | 1.77                            | 1.27                             | 1.146 | 36.1     | 22.9     | 1.19 |
| 1C2 | 粉 土     | 31.1  | 2.70 | 1.87                            | 1.42                             | 0.914 | 28.7     | 21.5     | 1.41 |
| 1C3 | 淤泥质粉质黏土 | 38.5  | 2.73 | 1.77                            | 1.28                             | 1.142 | 36.8     | 23.1     | 1.13 |
| 1D1 | 淤泥质粉质黏土 | 33.9  | 2.72 | 1.78                            | 1.32                             | 1.051 | 32.8     | 22.8     | 1.16 |
| 1D2 | 粉质黏土    | 36.1  | 2.73 | 1.78                            | 1.31                             | 1.094 | 37.5     | 23.2     | 0.88 |
| 1E1 | 粉 土     | 30.3  | 2.70 | 1.78                            | 1.33                             | 1.038 | 29.9     | 22.5     | 1.16 |
| 1E2 | 粉 砂     | 27.7  | 2.69 | 1.78                            | 1.38                             | 0.948 |          |          |      |

表 2 土层的力学性质指标

| 层 号 | 黏聚力 $c'/\text{kPa}$ |    | 内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$ |      | 无侧限抗压<br>强度/ $\text{kPa}$ | 压缩系数<br>$a_v/\text{MPa}^{-1}$ | 压缩模量<br>$E_s/\text{MPa}$ | 静力触探                     |                           |
|-----|---------------------|----|----------------------------|------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
|     | 固结快剪                | 直剪 | 固结快剪                       | 直剪   |                           |                               |                          | 锥头阻力<br>$q_c/\text{MPa}$ | 侧壁摩阻力<br>$f_s/\text{MPa}$ |
| 0B  | 33                  | 33 | 23.8                       | 14.5 | 41                        | 0.61                          | 3.81                     | 1.49                     | 56.7                      |
| 1A1 | 36                  | 36 | 17.2                       | 7.0  |                           | 0.52                          | 4.09                     | 0.81                     | 25.8                      |
| 1B1 | 15                  | 18 | 14.5                       | 5.2  | 48                        | 0.75                          | 3.12                     | 0.59                     | 14.2                      |
| 1B2 | 20                  | 17 | 21.5                       | 28.9 | 46                        | 0.38                          | 6.19                     | 2.92                     | 35.6                      |
| 1B3 | 15                  | 18 | 16.6                       | 15.9 | 51                        | 0.57                          | 3.75                     | 1.14                     | 28.2                      |
| 1C2 | 16                  | 22 | 22.5                       | 27.6 | 41                        | 0.28                          | 7.64                     | 3.39                     | 49.7                      |
| 1C3 | 26                  | 21 | 15.2                       | 14.9 | 57                        | 0.57                          | 3.88                     | 0.87                     | 17.4                      |
| 1D1 | 19                  | 19 | 16.9                       | 18.0 | 56                        | 0.46                          | 4.67                     | 2.59                     | 50.3                      |
| 1D2 | 27                  | 39 | 16.9                       | 11.9 | 148                       | 0.45                          | 4.79                     | 1.29                     | 26.8                      |
| 1E1 | 27                  | 16 | 18.2                       | 28.6 |                           | 0.29                          | 7.52                     | 7.15                     | 102.4                     |
| 1E2 | 23                  | 16 | 26.5                       | 29.1 |                           | 0.34                          | 6.29                     | 8.12                     | 98.3                      |

洪堤外侧即前坡的坡比为 1:2.3,后坡坡比为 1:3。坡顶宽度为 6 m。拟建的沿江管廊设计采用桩基础来支撑管架,每 3 或 4 根桩组成 1 个桩群,其上有一桩帽与管架相连。桩基为钻孔灌注桩,直径 500 mm,桩长在 25~40 m 之间,桩端部深入 1E2 土层内至少 1 m。

2 抗剪强度折减有限单元法分析

2.1 计算方法

边坡稳定安全系数  $F_s$  定义为抗剪强度参数折减到使边坡发生整体破坏时的系数。运用抗剪强度折减技术时,采用的抗剪强度参数  $c'_m$  和  $\varphi'_m$  分别按

式(1)和式(2)进行计算:

$$c'_m = \frac{c'}{R_F}$$
 (1)

$$\varphi'_m = \arctan\left(\frac{\tan\varphi'}{R_F}\right)$$
 (2)

式中: $c'$ 为黏聚力; $\varphi'$ 为内摩擦角; $R_F$ 为强度折减系数。

判别边坡是否达到极限破坏状态是采用抗剪强度折减有限单元法分析边坡稳定性的一个关键问题。文献[7]通过综合大量的分析计算结果发现,以塑性区的分布是否贯通作为边坡破坏的判断依据是不妥的,产生塑性区是破坏的必要条件,但不是充分条件,还要看是否产生很大的且无限发展的塑性变

形和位移,有限元计算中表现为塑性应变或位移产生突变。文献 1 采用强度折减的三维有限差分法,对边坡上无桩基和有桩基带桩套(为减小水平荷载向浅部边坡传递而在桩与桩周土之间填充的可压缩材料)的水平受荷桩下的稳定性进行了分析,主要研究了桩套的设置对边坡稳定性的影响,计算结果表明,边坡坡面包括坡顶和坡脚的位移值随强度折减系数的变化规律是相似的。因此,本文将根据坡脚位移值的变化来判断边坡的破坏。

上述研究成果为本文边坡破坏的判断提供了依据。图 2 为一典型的边坡稳定分析有限单元网格。(结点 A 位于坡脚)。在这里,边坡的整体破坏是根据图 2 中 A 结点的位移与强度折减系数的关系来定义的。采用弹塑性模型分析得到的结点位移  $d$  与强度折减系数  $R_F$  的关系见图 3,从图 3 中可以识别到整体破坏。当抗剪强度参数不断折减时,边坡的应力状态将达到某一临界状态,如图 3 中点 B 所示,超出 B 点,塑性区将出现并迅速膨胀,伴随着塑性区的膨胀,塑性位移随着  $R_F$  的增加而迅速增加。因此可以说整体破坏就发生在 B 点,相应于 B 点的  $R_F$  就可以看作是对应于边坡整体稳定破坏时的稳定安全系数。为便于识别边坡的整体破坏,可以采用归一化的结点位移,如图 3 所示。归一化的结点位移  $d_N$  定义为

$$d_N = \frac{d - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \tag{3}$$

式中: $d$  是相应于某  $R_F$  所计算的结点位移; $d_{\max}$  是相应于最大的  $R_F$  计算的结点位移; $d_{\min}$  是相应于最小的  $R_F$  计算的结点位移,可知  $0 \leq d_N \leq 1$ 。

2.2 模型参数

图 2 为用于江堤边坡稳定分析的二维有限单元网格图,图中几何左右边界均施加水平向约束,底边界施加水平向和竖向约束。

桩身材料假定为线弹性体,其弹性模量为

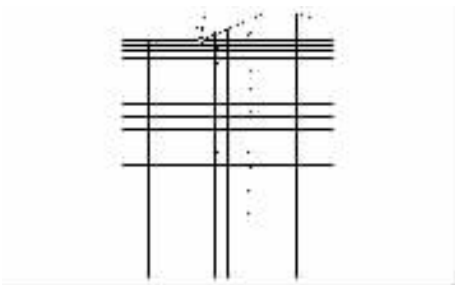


图 2 边坡稳定分析的典型单元网格

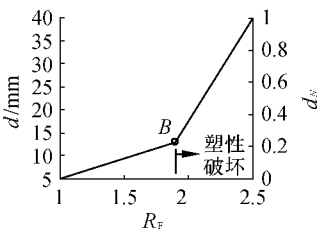


图 3 由  $d$  和  $d_N$  确定边坡破坏

21 GPa,泊松比为 0.2。土体采用修正剑桥模型(弹塑性)来进行模拟。该模型需要 7 个参数: $e_0, c', \varphi', \lambda, \kappa, G, \nu'$ 。其中初始孔隙比  $e_0$  可以从勘察报告中取用;在边坡稳定计算中采用有效应力分析,抗剪强度参数  $c'$  和  $\varphi'$  取自固结不排水试验得到的数值(见表 2);土体的泊松比  $\nu'$  全部假定为 0.2;剪切

模量  $G = \frac{E_s}{2(1 + \nu')} \left( 1 - \frac{2\nu'^2}{1 - \nu'} \right)$ ,  $E_s$  取值见表 2。

另外,正常固结线( $e \sim \ln p$  曲线)的斜率  $\lambda$  和土体的浮密度  $\rho'$  分别由式(4)和式(5)计算得到:

$$\lambda = \frac{0.1 a_v}{\ln 2} \tag{4}$$

$$\rho' = \frac{\rho}{1 + w} - \frac{1}{1 + e_0} \rho_w \tag{5}$$

式中: $a_v$  为勘察报告提供的压缩系数(见表 2); $\rho$  为土体的天然密度; $w$  为土体的含水率(见表 1); $\rho_w$  为水的密度。

边坡稳定分析中所采用的模型参数全部列于表 3。分析时,地下水位假定在 6.5 m 高程,即与堤基

表 3 有限单元分析模型参数

| 层号  | $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $e_0$ | $c' / \text{kPa}$ | $\varphi' / (^\circ)$ | $\lambda$ | $\kappa$  | $G / \text{kPa}$ | $\nu'$ |
|-----|------------------------------------------|-------|-------------------|-----------------------|-----------|-----------|------------------|--------|
| 0B  | 1.92                                     | 0.833 | 33                | 23.8                  | 0.053 380 | 0.017 793 | 1 687.5          | 0.2    |
| 1A1 | 1.88                                     | 0.936 | 36                | 17.2                  | 0.063 479 | 0.021 160 | 1 500.0          | 0.2    |
| 1B1 | 1.79                                     | 1.136 | 15                | 14.5                  | 0.093 775 | 0.031 258 | 1 125.0          | 0.2    |
| 1B2 | 1.83                                     | 0.980 | 20                | 21.5                  | 0.053 380 | 0.017 793 | 1 875.0          | 0.2    |
| 1B3 | 1.78                                     | 1.138 | 15                | 16.6                  | 0.089 447 | 0.029 816 | 1 125.0          | 0.2    |
| 1B4 | 1.82                                     | 1.012 | 19                | 22.5                  | 0.060 593 | 0.020 198 | 1 875.0          | 0.2    |
| 1C1 | 1.84                                     | 0.967 | 19                | 16.0                  | 0.060 593 | 0.020 198 | 1 687.5          | 0.2    |
| 1C2 | 1.88                                     | 0.880 | 16                | 22.5                  | 0.046 166 | 0.015 389 | 2 062.5          | 0.2    |
| 1C3 | 1.81                                     | 1.054 | 26                | 15.2                  | 0.069 249 | 0.023 083 | 1 500.0          | 0.2    |
| 1D1 | 1.81                                     | 1.033 | 19                | 16.9                  | 0.064 921 | 0.021 640 | 1 687.5          | 0.2    |
| 1D2 | 1.93                                     | 0.826 | 27                | 16.9                  | 0.043 281 | 0.014 427 | 2 250.0          | 0.2    |
| 1E1 | 1.92                                     | 0.785 | 27                | 18.2                  | 0.036 067 | 0.012 022 | 2 625.0          | 0.2    |

表面平齐。

2.3 荷载组合

根据设计要求,并考虑最不利于江堤稳定的荷载组合,确定3个计算断面中桩顶作用力的组合如表4所示,表中弯矩值为负表示该弯矩作用在不利于江堤稳定性的方向上。

2.4 计算结果及分析

对每个计算断面均进行了两次边坡稳定分析,一次是针对现有边坡,一次是针对设有桩基承载管廊的边坡。计算考察了图2中坡脚结点A的水平位移与强度折减系数之间的关系以确定边坡的整体破坏,从而确定稳定安全系数。

表4 桩顶作用力组合

| 计算断面 | 水平荷载/kN | 竖向荷载/kN | 弯矩/(kN·m) |
|------|---------|---------|-----------|
| 断面A  | 45.26   | 903.3   | -316.68   |
| 断面B  | 45.18   | 485.7   | -316.39   |
| 断面C  | 45.26   | 903.3   | -316.68   |

图4所示为断面A、断面B和断面C现有边坡和桩基施工后边坡的 $R_F$ 与 $d_N$ 之间的关系。从图中曲线斜率的变化可以确定整体边坡破坏发生在 $R_F$ 等于 $F_s$ 时。对于现有边坡,断面A、断面B、断面C计算得到的 $F_s$ 分别为2.8、2.4、1.9;对于设有桩基支撑管廊的边坡,断面A、断面B、断面C计算得到的 $F_s$ 分别为2.6、2.7、1.7。

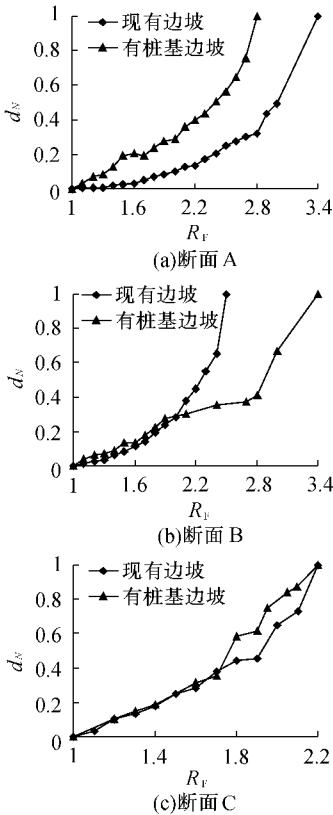


图4 各计算断面的 $d_N$ 与 $R_F$ 之间的关系

设有桩基支撑管廊的边坡问题具有正反两个方面的作用。一方面,边坡上的桩基提高了现有边坡的稳定性,起到抗滑桩的作用;但另一方面,施加在桩基上的荷载势必引起边坡的不稳定。从计算结果可以看出,对于断面A和断面C设有管廊的边坡,荷载对稳定性的影响要稍大于抗滑桩的影响,使得稳定安全系数较现有边坡稍低。而对于断面B设有管廊的边坡,荷载对稳定性的影响要稍小于抗滑桩的影响,使得稳定安全系数较现有边坡稍高。总体而言,桩基施工并架设管廊承载后对防洪堤边坡的稳定性影响不是很大,这也说明桩端部深入1E2土层内至少1m能够提供足够的抗滑力以抵抗来自管廊的荷载。

3 结论

采用抗剪强度折减技术的边坡稳定有限元分析结果表明,在长江防洪堤上采用桩基础承载管廊的竖直与水平荷载以及弯矩作用的设计方案是可行的。对于设有管廊的江堤边坡,一方面,在边坡上支撑管廊的桩基有助于提高现有边坡的稳定性;另一方面,作用在桩基上的荷载势必引起边坡的不稳定。从本工程中3个断面的边坡稳定分析可知,只要将桩端设计在合适的持力层土层上,正反两方面的效果基本可以抵消,使得桩基以及管廊施工后对于江堤边坡的稳定性影响很小。

参考文献:

[1] NG C W W, ZHANG L M, HO K K S. Influence of laterally loaded sleeved piles and pile groups on slope stability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(3): 553-566.

[2] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Géotechnique, 1999, 49(6): 835-840.

[3] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite element[J]. Géotechnique, 1999, 49(3): 387-403.

[4] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 406-411.

[5] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.

[6] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 1-8.

[7] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座(II): 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332-336.

(收稿日期: 2005-01-04 编辑: 骆超)